

УДК 551.345

КРИОЛИТОЗОНА СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА РОССИИ

© 2018 г. М.А. Холмянский*, А.О. Карташёв*, Е.М. Снопина**, М.В. Владимиров

**Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана им. академика И.С. Грамберга (ВНИИОкеангеология),
Английский проспект, д.1, Санкт-Петербург, 190121 Россия.
E-mail: holm936@rambler.ru*

***Общество с ограниченной ответственностью "ТехноТерра" (ООО "ТехноТерра"),
наб. р. Фонтанки, д.113, лит. А, Санкт-Петербург, 190031 Россия.
E-mail: snopova-katya@mail.ru*

Поступила в редакцию 18.11.2016 г.
После исправления 6.03.2017 г.

Опубликованные на рубеже девяностых и двухтысячных годов геокриологические карты основаны на скудных фактических данных бурения и каротажа многолетнемерзлых пород, результатах термодинамического моделирования и методе аналогий – переноса характеристик многолетнемерзлых пород, детально изученных на суше, на близкие по геологическому строению и палеогеографии районы шельфа.

На основании анализа палеогеографической, палеоклиматической и геоморфологической обстановки на акватории Баренцева, Белого и Карского морей в четвертичное время сформулирована версия различных вариантов строения мерзлой зоны шельфа этих морей.

В результате анализа существующих материалов, статей и отчетов начиная с 1970 г., включающих, в том числе редкие данные бурения, каротажа и моделирования, исследования результатов электрозвездочных работ методом становления электромагнитного поля в ближней зоне, впервые проведенных с геокриологическими целями, а также интерпретации всех имеющихся сейсмических и сейсмоакустических материалов, построена новая версия геокриологической карты акватории Западно-Арктического шельфа России с указанием мощности конкретных типов многолетнемерзлых пород и их пространственными границами.

Ключевые слова: криолитозона, геокриологическая карта, шельф, метод становления электромагнитного поля в ближней зоне, многолетнемерзлые породы, многолетнеохлажденные породы, мерзлая зона шельфа, сейсмические и сейсмоакустические материалы.

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Различным вопросам, посвященным генезису, строению и развитию криолитозоны Баренцева, Белого и Карского морей, посвящено сравнительно ограниченное число отечественных и зарубежных работ. К сожалению, все авторы опубликованных и фондовых материалов располагали скудными фактическими данными, позволяющими оценить реальные характеристики многолетнемерзлых пород (далее – ММП), основанными на прямых их определениях (по бурению и каротажу). Поэтому использовались, в первую очередь, результаты термодинамического моделирования и метод аналогий – переноса характеристик ММП, детально изученных на суше, на близкие по геологическому строению и палеогеографии районы шельфа. Наиболее полное отображение указанные материалы

получили в атласах геокриологических карт, опубликованных на рубеже девяностых и двухтысячных годов [3–5].

Авторы настоящей статьи посчитали возможным создать свою версию геокриологической карты шельфа указанных морей, что и является основной ее целью.

Как известно, происхождение и последующая трансформация ММП связаны с этапами климатических похолоданий и потеплений, обусловленными тектоническими, термодинамическими причинами, трансгрессиями и регрессиями арктического океана.

Пространственные границы криолитозоны, тип и мощность ММП, в первую очередь, определяются именно тектоно-океанологическим режимом арктического океана в разные геологические эпохи.

Характеристика этапов этого режима основана на анализе палеогеографических материалов с учетом схем, предложенных предшествующими исследователями [1, 4, 6, 9, 10, 13, 14, 16, 20, 22, 23, 26, 28].

Конец самаровского времени отмечен трансгрессией океана, достигавшего 61° с.ш. В основном вся морская площадь находилась в немерзлом состоянии. Южнее же мощность криолитозоны достигала 500–600 м. В конце казанцевского времени океан отступил до 65° с.ш., началось интенсивное промерзание освободившейся суши. Конец зырянского времени ознаменован продолжением регрессии океана, южнее 61° с.ш. мощность криолитозоны увеличивается. То же самое характерно и для каргинского времени. Сартанское время – похолодание климата, сменившееся потеплением, которое в голоцене опять сменилось похолоданием, продолжающимся и в настоящее время. В.А. Соловьев отмечал цикличность в смене холодных–теплых периодов с периодичностью около 100 тыс. лет [20].

Смена климатических режимов приводит к вытаиванию льда в подошве и кровле ММП, замене его охлажденной морской водой, что обеспечивает появление горизонтов многолетнеохлажденных пород (МОП), вмещающих ММП или полностью их заменивших. Мощность этих горизонтов охлажденных пород может меняться в широких пределах, зависящих от палеогеографических и современных температурных условий.

В большинстве случаев сплошные ММП находятся между горизонтами охлажденных пород. По заключению разных авторов [6, 10, 11–15, 18–20, 23, 26, 28], мощности слоев ММП могут достигать до 800 м, охлажденных горизонтов – до 100 м.

ММП, образованные на суше в периоды похолодания, переходят в субмаринные при затоплении и перекрываются при трансгрессии моря морскими осадками, накапливающимися в период потепления. Авторам удалось установить четкую связь мощности ММП с геоморфологическим строением акватории. Это можно объяснить распределением термодинамических потоков, меняющих температурное состояние ранее образовавшихся ММП.

Толща во внешних частях шельфа, прошедшая стадии похолодания и потепления в среднем-позднем плейстоцене (криогенные преобразования), может быть охарактеризована следующей структурой: верхний горизонт состоит из пород, в которых вытаявший лед заменен охлажденной морской водой с температурой ниже 0°C ; средний горизонт представляют ненарушенные горные породы, а еще ниже залегают породы, охлажденные за счет протаивания снизу.

Криолитозона имеет сплошное распространение до современных глубин моря 50–60 м, прерывистое и островное от этих глубин до 80–100 м. Выше и ниже ММП находятся охлажденные породы мощностью более 100 м. Наибольшая мощность криолитозоны в горстах доходит до 1000 м (в ней ММП до 700 м). Наименьшая мощность криолитозоны свойственна грабенам (300–100 м). В них имеются талики, возникшие в результате термокарстового процесса на этапе осушения и затем после затопления трансформировавшиеся в субмаринные.

Арктическому бассейну свойственны как сингенетические, так и эпигенетические ММП. Вместе с тем в большинстве случаев отмечен полигенетический тип ММП. На основании анализа палеогеографической, палеоклиматической и геоморфологической обстановки на акватории Баренцева, Белого и Карского морей в четвертичное время сформулирована версия существования различных вариантов строения мерзлой зоны шельфа этих морей.

Основные положения этой версии:

- ММП и МОП отсутствуют;
- в разрезе присутствует слой ММП или МОП, сформировавшийся во время последнего верхнеплейстоцен-голоценового похолодания и последующих трансформаций климата, хорошо отражающийся в геоэлектрическом и сейсмоакустическом разрезах; реликтовая криолитозона отсутствует;
- криолитозона представлена вниз по разрезу: вышеуказанным горизонтом – тальми или охлажденными породами – ММП, подстилаемыми горизонтом охлажденных пород;
- разрез идентичен описанному выше, но “голоценовый” горизонт отсутствует;
- реликтовые ММП или охлажденные породы залегают между тальных отложений;
- самая сложная по строению криолитозона представлена трехслойным разрезом: голоценовый слой ММП – тальные породы – двухслойный разрез ММП.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для построения геокриологической карты авторами проведен анализ существующих материалов, статей и отчетов начиная с 1970 г. включающих, в том числе редкие данные бурения, каротажа и моделирования. Кроме того, использовали результаты выполненных электроразведочных работ методом становления электромагнитного поля в ближней зоне. Первые попытки применения этого метода в геокриологических целях были сделаны в проливе Дмитрия Лаптева [2]. Метод становления поля – один из вариантов индукционных

электромагнитных зондирований, основан на изучении неустановившегося электромагнитного поля при ступенеобразном изменении тока.

Для решения нашей задачи наиболее эффективно использование зондирования методом становления электромагнитного поля в ближней зоне при r , значительно меньшем H , где r – расстояние от источника до приемника электромагнитного поля, H – глубина залегания кровли мерзлоты. В качестве источника электромагнитного поля используется линейная установка, позволяющая проводить стабильные измерения в морских условиях.

Время регистрации кривой зондирования при определении глубины залегания кровли и мощности мерзлой зоны должно удовлетворять существующим уравнениям, основанным на трех-десятикратном превышении длины установки над мощностью изучаемого геологического разреза, содержащего зону многолетней мерзлоты.

Горизонт ММП находит четкое отражение на кривых проводимости, что иллюстрируется на рис. 1. На рис. 2 приводится геологический разрез, построенный на основании интерпретации кривых, полученных в проливе Дмитрия Лаптева. Очень важно отметить, что последующее бурение по линии разреза полностью подтвердило геофизические данные.

Для построения геокриологической карты проведена интерпретация всех имеющихся сейсмических и сейсмоакустических материалов, что ранее

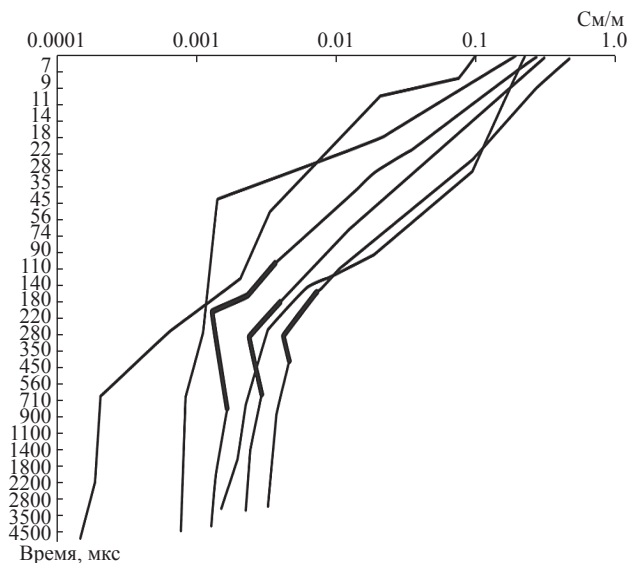


Рис. 1. Кривые зондирования методом становления электромагнитного поля в ближней зоне. Жирная линия – участок кривой, обусловленный наличием многолетнемерзлых пород.

с геокриологических позиций никогда не проводилось. Считалось, что верхняя часть сейсмических диаграмм неинтерпретируема и не представляет интереса ни для нефтяников, ни для тех, кто занимается глубинной геологией.

Сейсмические материалы для геокриологических целей должны использоваться избирательно

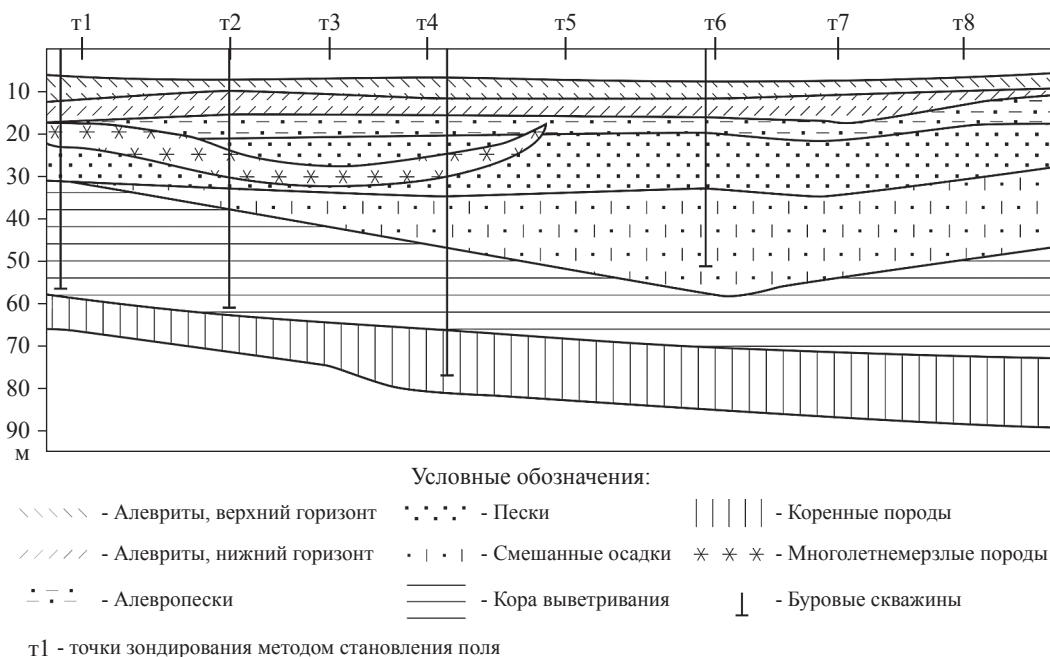


Рис. 2. Литолого-геокриологический разрез, построенный по данным электроразведки.

[25]. Если существует заверка выделенных на сейсмограммах геокриологических горизонтов материалами бурения или каротажа, пусть даже в ограниченном числе буровых скважин, на наш взгляд, данные сейсморазведки могут быть использованы. Это подтверждается материалами, полученными рядом авторов [7, 8, 17].

Сейсмограммы, подтверждающие это заключение, представлены на рис. 3–5. На рис. 3 приводятся зарубежные данные, полученные на шельфе моря Лаптевых К. Hinz, G. Delisle, M. Block [24], проводившими 2-D сейсмические наблюдения. Как видно из рис. 3, подошва ММП четко отражается на временном сейсмическом разрезе. Рис. 4, 5 показывают отражение в сейсмическом разрезе нескольких вариантов строения ММП, охарактеризованных выше, изученных на акватории Баренцева и Карского морей. Кровля ММП вскрыта скважинами в диапазоне глубин от 20–30 м до 40–50 м ниже поверхности дна. Подошва залегает, вероятно, на глубине 70–100 м. Это, в целом, соответствует нашим данным по электроразведке.

Результаты моделирования, выполненного разными исследователями [15, 16, 19, 20, 22, 26], обобщены в работе Н.Н. Романовского [16] и сводятся к выводам:

- мощность субмаринной криолитозоны на арктическом шельфе может достигать 600–900 м; она может быть многоярусной;

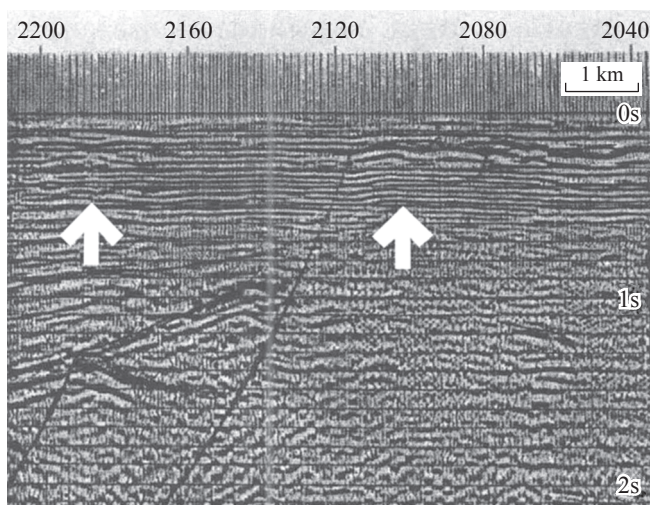


Рис. 3. Пример отображения зоны многолетнемерзлых пород на сейсмической записи. Белыми стрелками отмечено положение подошвы слоя ММП.

- мощность меняется за счет промерзания сверху на этапе регрессий и протаивания снизу на этапе трансгрессий (под влиянием теплового потока);

- график современных температур в криолитозоне – безградиентный;

- кровля реликтовых пород по площади расчленена таликами мощностью не более 150 м, образовавшимися в результате развития озерного термокарста на этапах перехода от регрессий к трансгрессиям;

- существование сквозных таликов возможно в зонах тектонических нарушений;

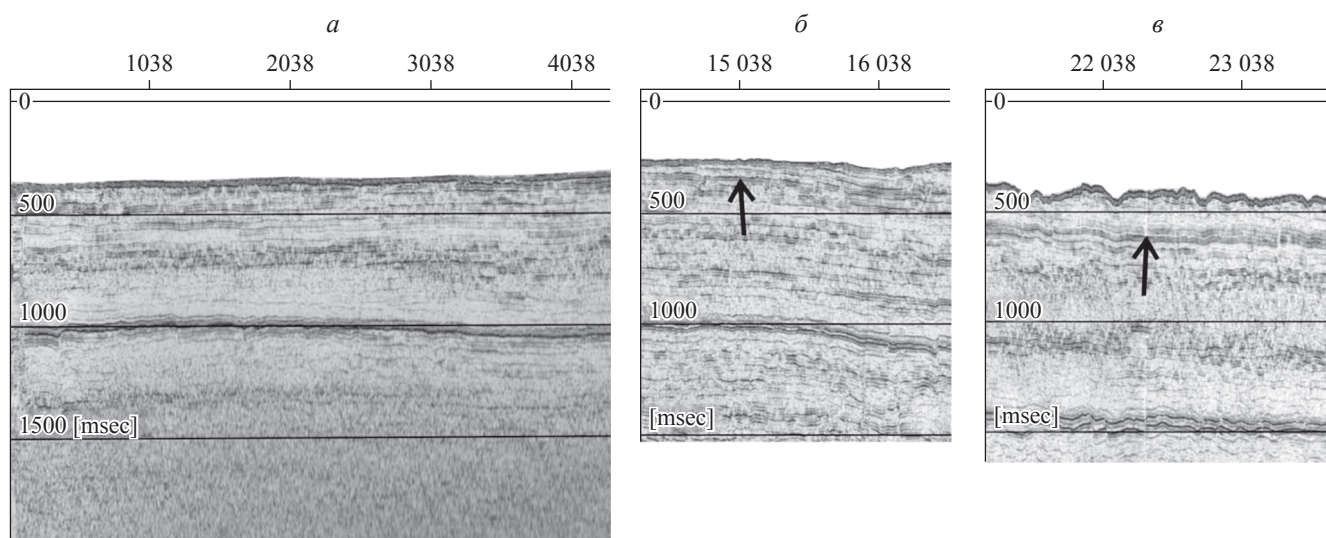


Рис. 4. Фрагменты временных сейсмических разрезов: *а* – ММП – отсутствуют; *б–в* – при наличии ММП, стрелками показано положение границы: *б* – ММП голоценового возраста, *в* – реликтовых ММП.

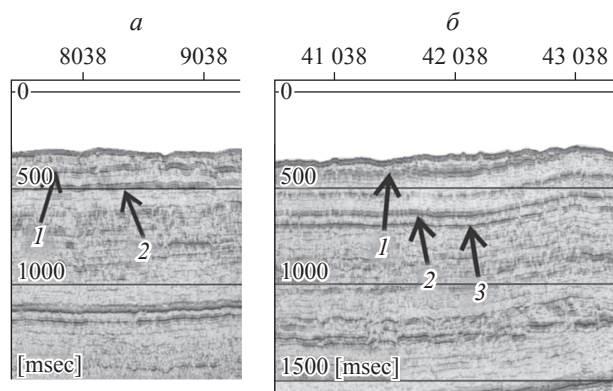


Рис. 5. Фрагмент временного сейсмического разреза. Строение ММП: а – двухслойное, б – трехслойное. Стрелками показано положение границ: 1 – голоценовых ММП; 2, 3 – реликтовых ММП.

– талики также контролируются проявлением газовой эмиссии на поверхность, что хорошо иллюстрируется записями сейсмоакустики.

Толща во внешних частях шельфа, находившаяся на древней стадии преобразования, включает: верхний горизонт, состоящий из пород, в которых вытаявший лед заменен охлажденной морской водой с температурой ниже 0 °С; средний горизонт – ненарушенных горных пород; нижний горизонт – пород, охлажденных за счет протаивания снизу.

Так как к современному шельфу примыкают палеошельфы Печорской и Западно-Сибирской низменностей, для сравнения можно использовать данные о строении мерзлоты на этих площадях. Выполненные здесь геокриологические исследования включают значительный объем буровых и каротажных работ.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Один из основоположников геокриологического моделирования на шельфе А.А. Шарабатян выделяет четыре этапа формирования и развития ММП [22]. Он отмечает, что наибольший интерес представляют первые два этапа, связанные с регрессией и трансгрессией моря.

Первый этап длинный – с начала многолетне-го промерзания пород до окончания Ямальской трансгрессии. Промерзание началось в начале четвертичного периода с начала похолодания климата. С начала плейстоцена и до казанцевского времени территория низменности была занята опресненными водами, южная граница которых проходила по 63° с.ш. На протяжении значительной части первого периода развития

ММП водный бассейн располагался севернее 64° с.ш. Породы, промерзшие к началу трансгрессии, оттаивали под опресненным водоемом. Поэтому ММП, существующие в настоящее время к северу от этой широты, начали формироваться после регрессии моря.

Второй этап развития ММП охватывает вторую половину верхнего плейстоцена и часть голоцена (до климатического оптимума). По мере регрессии водного бассейна на протяжении казанцевского времени промерзание проходило на новых территориях, свободных от моря. На островах, появившихся на крайнем севере низменности при понижении уровня моря, началось эпигенетическое промерзание пород.

Дальнейшее развитие ММП определялось потеплением климата и частичным протаиванием пород (климатический оптимум – третий этап), последующим похолоданием и новым промерзанием пород (позднеголоценовое время – четвертый этап развития ММП).

Подробное описание строения позднеголоценовой мерзлой зоны в разрезе шельфа приводится канадскими и американскими исследователями для акватории моря Бофорта [27, 28], где буровыми работами установлено, что под поверхностными талыми отложениями общей мощностью 20 м залегает горизонт ММП, достигающий мощности несколько десятков метров. Большое количество скважин, пробуренных на шельфе Канады и Аляски, показывает, что этот горизонт встречается на значительной территории шельфа при глубине моря 10–20 м и на удалении от берега до десятков километров.

По условиям формирования ММП шельфа подразделяются на два типа: реликтовые, сформировавшиеся в континентальных условиях и в дальнейшем перешедшие в субаквальное положение, и ММП, сформировавшиеся под припайным льдом. Первый тип характеризуется мощностью от единиц до первых сотен метров, разнообразием криогенных текстур, наличием подмерзлотных и внутримерзлотных вод. Мощности второго типа не превышают первых десятков метров.

В рассматриваемом районе шельф относительно глубоководен, осложнен подводными возвышенностями и желобами. Широко развиты многолетнеохлажденные грунты, содержащие массивы ММП. Подавляющее большинство таликов не сквозные.

В результате детального анализа палеогеографических, геоморфологических и тектонических материалов, и на основе выполненной интерпретации собственных профильных

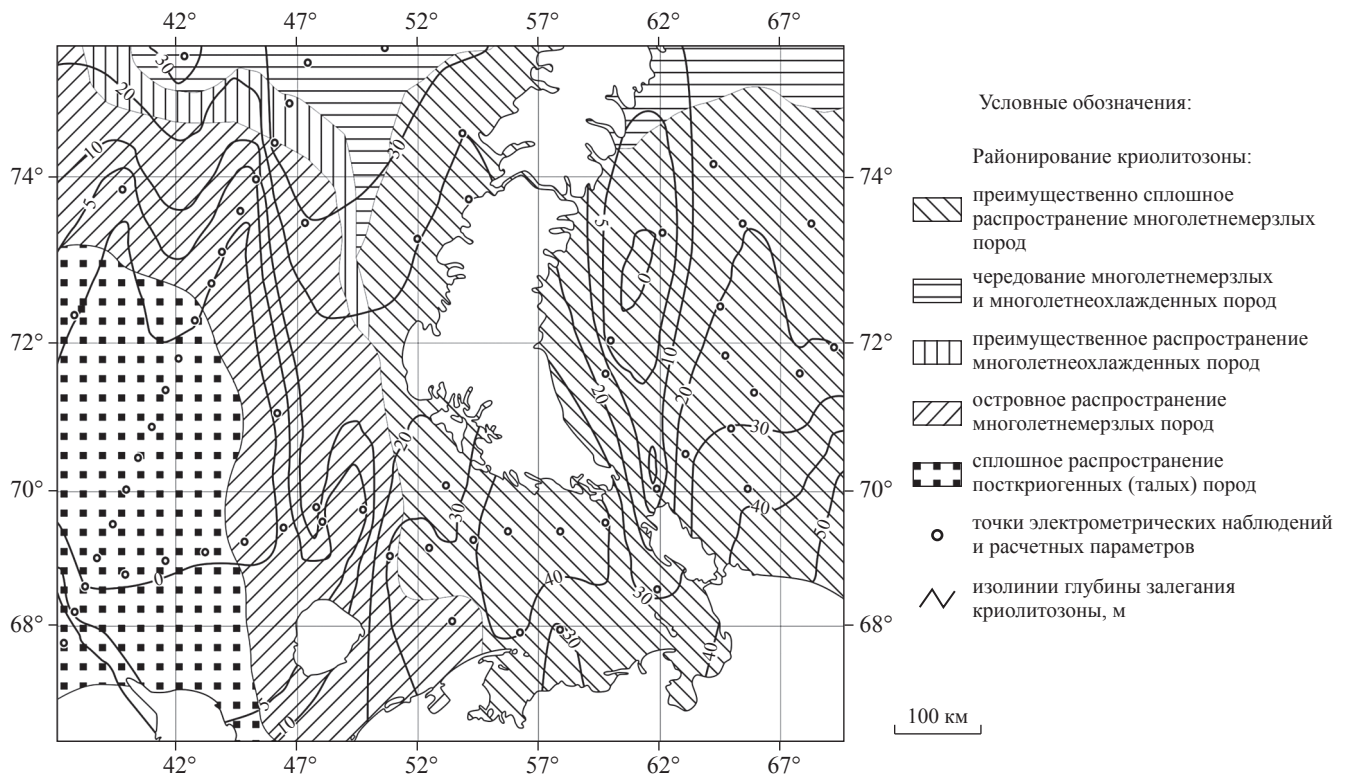


Рис. 6. Карта глубин залегания криолитозоны.

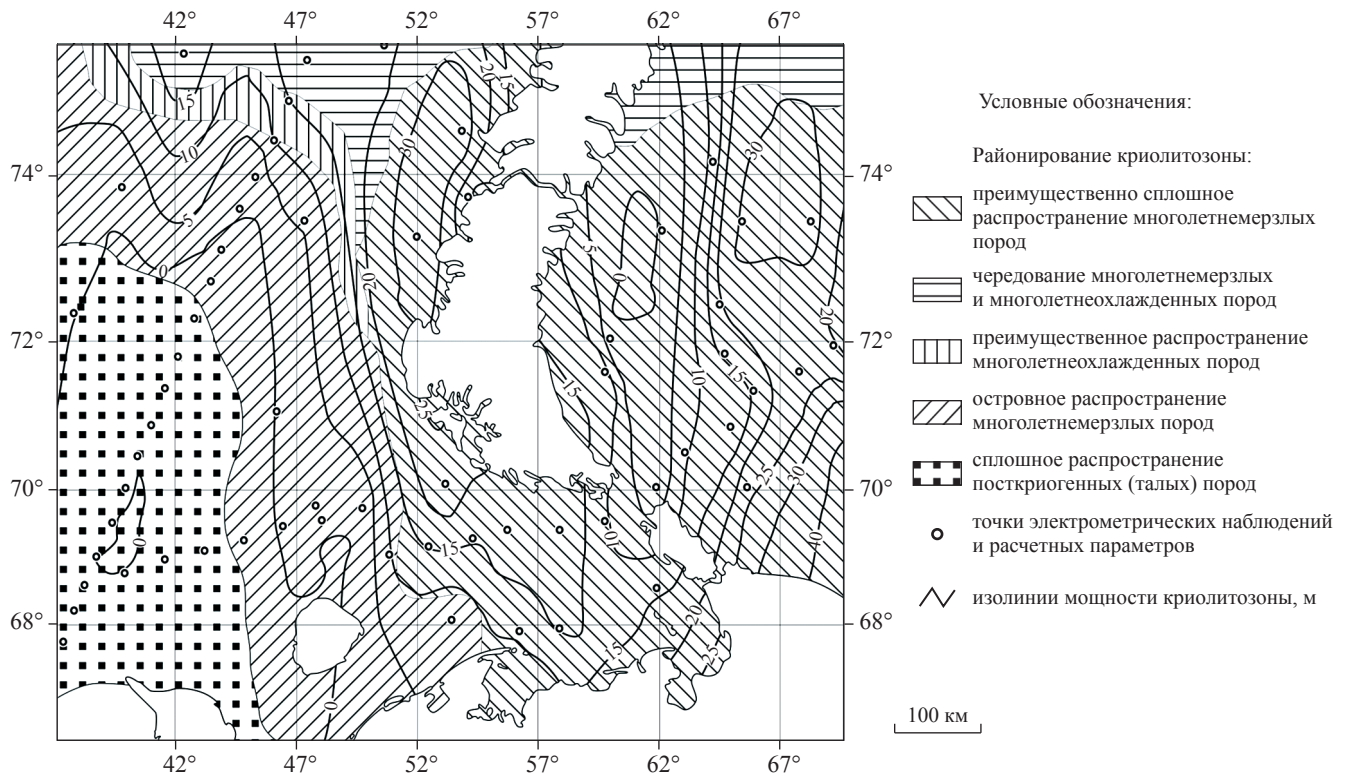
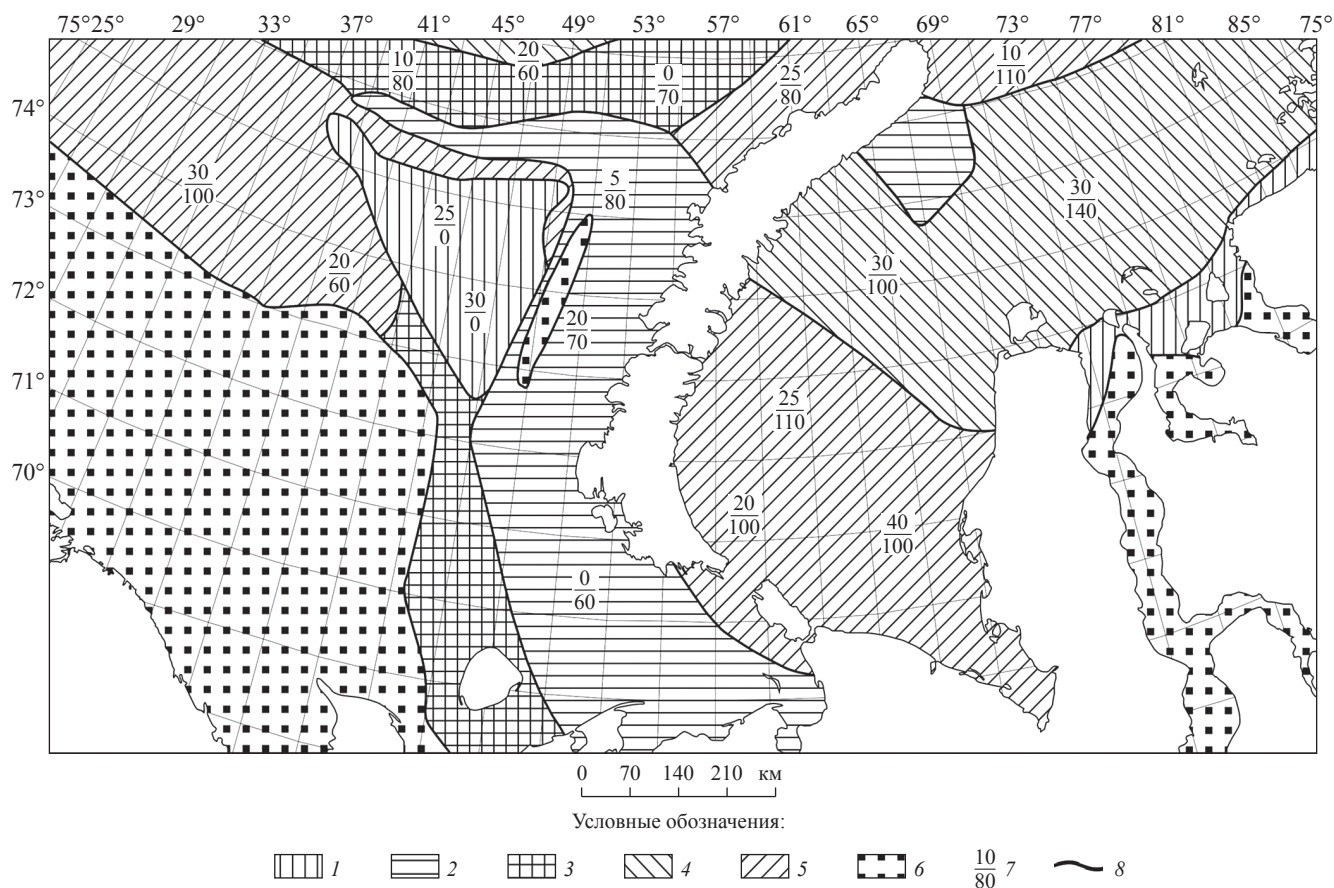


Рис. 7. Карта мощности криолитозоны.



1—однослойная криолитозона, представленная верхне-плейстоценовыми – голоценовыми отложениями; 2—однослойные реликтовые многолетнемерзлые отложения; 3—двухслойные реликтовые многолетнемерзлые отложения; 4—трехслойная криолитозона, представленная голоценовыми и двухслойными реликтовыми преимущественно многолетнемерзлыми породами; 5—трехслойная криолитозона, представленная голоценовыми и двухслойными реликтовыми преимущественно многолетнеохлажденными породами; 6—талые посткриогенные отложения; 7—мощность криолитозоны: числитель – верхнеплейстоценовых - голоценовых отложений, знаменатель – реликтовые многолетнемерзлые (многолетнеохлажденные) породы; 8—границы геокриологических районов.

Рис. 8. Геокриологическая карта акватории северо-западного Арктического шельфа России.

электроразведочных измерений и определенного объема сейсмических данных, использования геокриологических карт (рис. 6, 7), построенных авторами ранее как самостоятельно, так и в соавторстве [2, 13], построена геокриологическая карта для площади акватории Западно-Арктического шельфа России.

Успешное использование геофизических материалов для геокриологических построений основано на отличии петрофизических характеристик многолетнемерзлых и талых пород. Эти характеристики детально изучались авторами для осадков и пород арктического шельфа [2, 21].

Основу построенной карты составляют выделенные авторами типы геокриологического разреза, соответствующие предложенной выше версии. Основные критерии для определения типа разреза – его характеристики, полученные в результате интерпретации

сейсмических и электроразведочных материалов, детального площадного анализа палеогеографических и геоморфологических карт, небольшой объем буровых и каротажных данных и результаты сопоставления геокриологических особенностей шельфовых и наземных районов с близким типом криолитозоны.

На геокриологической карте акватории Западно-Арктического шельфа России выделены площади распространения (рис. 8):

- однослойной криолитозоны, представленной верхнеплейстоценовыми-голоценовыми отложениями;
- однослойных реликтовых ММП;
- двухслойных реликтовых ММП;
- трехслойной криолитозоны, представленной голоценовыми и двухслойными реликтовыми,

преимущественно многолетнеохлажденными породами;

– талых посткриогенных отложений.

Данная карта является одной из возможных версий строения криолитозоны. Для уточнения представленной версии, основанной на перечисленных выше материалах, требуется проведение дополнительных буровых и связанных с ними каротажных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абатурова И.В., Стороженко Л.А., Петрова И.Г., Савинцев И.А.* Строение и закономерности распространения многолетнемерзлых пород в северной геокриологической зоне // Сергеевские чтения. Вып. 18. М.: РУДН, 2016. С. 531–535.
2. *Алхименко А.П., Великанов Ю.С., Карцев А.Ю., Холмянский М.А.* Экологическая безопасность при освоении нефтегазовых месторождений на шельфе Карского моря. СПб.: СПбГУ, 2004. 160 с.
3. Атлас: Геология и полезные ископаемые шельфов России. Лист 3–12. Палеокриолитозона. М.: ГИН РАН, 2011.
4. Атлас палеогеографических карт “Шельфы Евразии в мезозое и кайнозое”. Т. 1, 2. М.: ГИН АН СССР, Робертсон ГРУИ.
5. *Баранов И.Я.* Геокриологическая карта СССР. Масштаб 1:5 000 000. М.: ГУГК СССР, 1977.
6. *Баулин В.В.* История “подземного оледенения” Западной Сибири в связи с трансгрессией Арктического бассейна // Северный Ледовитый океан и его побережье в кайнозое. Л.: Гидрометеиздат, 1970. С. 404–409.
7. *Воронков О.К.* Инженерная сейсмика в криолитозоне (Изучение строения и свойств мерзлых и талых горных пород и массивов). СПб.: Изд-во ОАО “ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева”, 2009. 401 с.
8. *Зыков Ю.Д.* Геофизические методы исследования криолитозоны: Учебник М.: Изд-во МГУ, 2007. 272 с.
9. *Линдберг Г.У.* Крупные колебания уровня океана в четвертичный период. Л.: Наука, 1972. 548 с.
10. *Мельников В.П., Спесивцев А.Н.* Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. Новосибирск: Наука, 1995. 198 с.
11. *Мельников В.П., Скворцов А.Г., Малкова Г.В. и др.* Результаты изучения геокриологических условий арктических территорий с помощью геофизических методов // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 1. С. 171–180.
12. Морские инженерно-геологические исследования. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2003. 177 с.
13. *Неизвестнов Я.В., Боровик О.В., Козлов С.А., Холмянский М.А.* Поддонная криолитозона Баренцева, Карского и Белого морей // Матер. третьей конференции геокриологов России. М.: МГУ, 2005. Т. 3. С. 184–190.
14. *Рокос С.И., Длугач А.Г., Локтев А.С., Костин Д.А., Куликов С.Н.* Многолетнемерзлые породы шельфа Печорского и Карского морей: генезис, состав, условия распространения и залегания // Инженерные изыскания. 2009. № 10. С. 38–41.
15. *Романовский Н.Н., Холодов А.Л., Гаврилов А.В.* Мощность мерзлых толщ восточной части шельфа моря Лаптевых (результаты моделирования) // Криосфера Земли. 1999. Т. 3. № 2. С. 22–32.
16. *Романовский Н.Н., Тумской В.Е.* Ретроспективный подход к оценке современного распространения и строения шельфовой криолитозоны восточной Арктики // Криосфера Земли. Т. XV. № 1. 2011. С. 3–14.
17. *Скворцов А.Г., Царев А.М., Садуртдинов М.Р.* Особенности использования сейсмических методов при инженерно-геокриологических исследованиях // Матер. Четвертой конференции геокриологов России. М.: ИД Университетская книга, 2011. Т. 1. С. 225–232.
18. *Соловьёв В.А.* О связи некоторых характеристик мерзлой зоны с тектоническим строением Усть-Енисейской впадины // Гидрогеология Енисейского Севера. Вып.1. Л.: НИИГА, 1969. С. 90–96.
19. *Соловьёв В.А.* Прогноз распространения реликтовой субаквальной мерзлой зоны (на примере восточно-арктических морей) // Криолитозона арктического шельфа, Якутск: Изд-во. ИМ Со АН СССР, 1981. С. 28–38.
20. Криогеотермия и гидраты природного газа в недрах Северного Ледовитого Океана. Л.: Изд-во НИИГА, 1987. 226 с.
21. *Холмянский М.А.* Локальные естественные электрические поля арктического шельфа СССР. Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Л. 1986. 38 с.
22. *Шарабатян А.А.* Экстремальные оценки в геотермии и геокриологии. М.: Наука, 1974. 124 с.
23. *Шполянская Н.А.* Плейстоцен-голоценовая история развития криолитозоны Российской Арктики “глазами” подземных льдов. Москва–Ижевск: Изд-во Института компьютерных исследований, 2015. 370 с.
24. *Hinz K., Delisle G., Block M.* Seismic evidence for the depth extent of permafrost in shelf sediments of the Laptev sea, Russian arctic // PERMAFROST – Seventh International Conference (proceedings). Yellowknife (Canada), Collection Nordicana, 1998. № 55. P. 53–57.
25. *Hobson G.D.* Hammer seismic investigation, Good Spirit Lake area // Pap. Geol. Surv. Can. 1967. N. 1. P. 37–41.
26. *Lozan Jose, Grabi Harimuf, Hupfer Peter* Climate of the 21st century: changes and risks. Hamburg. GEO Wissenschaftliche Auswertungen, 2002. 450 p.
27. *Rogers J.C., Morack J.L.* Geophysical investigation of offshore permafrost, PrudHoe Bay, Alaska // Proc. of the 3th Intern. Conf. on Permafrost, Edmonton, Canada, 1978. V. 1. P. 560–566.
28. Permafrost in the Beafort Sea, Alaska // Proc. of the 4th Intern. Conf. on Permafrost, Fairbanks. USA. 1983, V. 1. P. 894–898.

REFERENCES

1. Abaturova, I.V., Storozhenko, L.A., Petrova, I.G., Savintsev, I.A. *Stroenie i zakonomernosti rasprostraneniya mnogoletnemerzlykh porod v severnoi geokriologicheskoi zone* [The structure and distribution patterns of permafrost in the northern geocryological zone]. Sergeevskie chteniya, Moscow, RUDN, 2016. pp. 531–535. (in Russian)
2. Alkhimenko, A.P., Velikanov, Yu.S., Kartsev, A. Yu., Kholmyanskii, M.A. *Ekologicheskaya bezopasnost' pri osvoenii neftegazovykh mestorozhdenii na she'l'fe Karskogo morya* [Environmental safety in the development of oil and gas deposits on the shelf of the Kara Sea], St. Petersburg, SPbGU, 2004. 160 p. (in Russian)
3. *Atlas: Geologiya i poleznye iskopaemye shel'fov Rossii. List 3–12 Paleokriolitozona* [Atlas of Geology and Mineral Resources of the Russian Shelf. Sheet 3–12 Paleocriolithozone]. Moscow, GIN RAN, 2011.
4. *Atlas paleogeograficheskikh kart "Shel'fy Evrazii v mezozoe i kainozoe"* [Atlas of paleogeographic maps of Eurasia shelves in Mesozoic and Cenozoic eras]. Vol.1, 2, Moscow, GIN AN SSSR, Robertson GRUI.
5. Baranov, I. Ya. *Geokriologicheskaya karta SSSR* [Geocryological map of the USSR]. Scale 1: 5 000 000. Moscow, 1977. (in Russian)
6. Baulin, V.V. *Istoriya "podzemnogo oledneniya" Zapadnoi Sibiri v svyazi s transgressiei Arkticheskogo basseina* [The history of "underground glaciation" in the Western Siberia due to the Arctic basin transgression]. *Severnyi Ledovityi okean i ego poberezhie v kainozoe* [Arctic Ocean and its coast in the Cenozoic]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1970, pp. 404–409. (in Russian)
7. Voronkov, O.K. *Inzhenernaya seismika v kriolitozone (Izucheniye stroeniya i svositv merzlykh i talykh gornykh porod i massivov)* [Seismic engineering in the permafrost (the study of structure and properties of frozen and thawed rocks and massifs)]. St. Petersburg, OAO VNIIG im. B.E. Vedeneeva, 2009, 401 p. (in Russian)
8. Zykov, Yu.D. *Geofizicheskie metody issledovaniya kriolitozony* [Geophysical methods of cryolithozone study], Moscow, MGU Publ., 2007, 272 p. (in Russian)
9. Lindberg, G.U. *Krupnye kolebaniya urovnya okeana v chetvertichnyi period* [Major fluctuations of the sea level in the Quaternary period]. Leningrad, Nauka, 1972, 548 p. (in Russian)
10. Melnikov, V.P., Spesivtsev, A.N. *Inzhenerno-geologicheskie I geokriologicheskie usloviya shel'fa Barentseva i Karskogo morei* [Geotechnical and permafrost conditions of the Barents and Kara Seas]. Novosibirsk, 1995, 198 p. (in Russian)
11. Melnikov, V.P., Skvortsov, A.G., Malkova, G.V., et al. *Rezultaty izucheniya geokriologicheskikh uslovii arkticheskikh territorii s pomosh'yu geofizicheskikh metodov* [The results of studying permafrost conditions of the Arctic territories by means of geophysical methods]. *Geologiya i geofizika*, 2010, vol. 51, no. 1, pp. 171–180. (in Russian)
12. *Morskie inzhenerno-geologicheskie issledovaniya* [Marine engineering geological studies]. St. Petersburg, VNIIOkeangeologia, 2003, 177 p. (in Russian)
13. Neizvestnov, Ya.V., Borovik, O.V., Kozlov, S.A., Kholmyanskii, M.A. *Poddonnaya kriolitozona Barentseva, Karskogo i Belogo morei* [Subbottom permafrost of the Barents, Kara and White Seas]. Proceedings of the Third Conference of Russian geocryologists, Moscow, MGU, 2005, vol. 3, pp. 184–190. (in Russian)
14. Rokos, S.I., Dlugach, A.G., Loktev, A.S., Kostin, D.A., Kulikov, S.N. *Mnogoletnemerzlye porody shel'fa Pechorskogo i Karskogo morei: genesis, sostav, usloviya rasprostraneniya i zaleganiya* [Permafrost shelf of the Pechora and Kara Seas: the genesis, composition, terms of distribution and occurrence]. *Inzhenerye izyskaniya*, Moscow, 2009, no.10, pp. 38–41. (in Russian)
15. Romanovskii, N.N., Kholodov, A.L., Gavrilov, A.V. *Moshchnost' merzlykh tolshch vostochnoi chasti morya Laptevyykh (rezul'taty modelirovaniya)* [Thickness of permafrost in the eastern sea shelf of the Laptev Sea (simulation results)]. *Kriosfera Zemli*, 1999, vol.3, no. 2, pp. 22–32. (in Russian)
16. Romanovskii, N.N., Tumskoii, V.E. *Retrospektivnyi podkhod k otsenke sovremennogo rasprostraneniya i stroeniya shel'fovi kriolitozony vostochnoi Arktiki* [The retrospective approach to the assessment of the current distribution and the structure of the shelf of the Arctic permafrost zone east], *Kriosfera Zemli*, 2011, vol. 15, no. 1, pp. 3–14. (in Russian)
17. Skvortsov, A.G., Tsarev, A.M., Sadurtdinov, M.R. *Osobennosti ispol'zovaniya seismicheskikh metodov pri inzhenerno-geokriologicheskikh issledovaniyakh* [Peculiarities in the use of seismic methods in engineering geocryological studies]. Proceedings of the Fourth Conference of Russian geocryologists (Moscow, 7–9 June 2011), Moscow, ID Universitetskaya kniga, 2011, vol. 1, pp. 225–232. (in Russian)
18. Solov'ev, V.A. On the relationship of some characteristics of the permafrost zone with the tectonic structure of the Ust-Yenisei depression. *Gidrogeologiya Eniseiskogo Severa* [Hydrogeology of the Yenisei North], no. 1, Leningrad, NIIGA, 1969, pp. 90–96. (in Russian)
19. Solov'ev, V.A. Forecast of the distribution of relic subaqueous frozen zone (by the example of the Eastern Arctic seas). *Kriolitozona arkticheskogo shel'fa* [Permafrost zone of the Arctic shelf], Yakutsk, IM SO AN SSSR, 1981, pp. 28–38. (in Russian)
20. *Kriogeotermya i gidraty prirodnogo gaza v nedrakh Severnogo ledovitogo okeana* [Cryogeothermy and hydrates of natural gas in the depths of the Arctic Ocean]. Leningrad, NIIGA, 1987. 226 p. (in Russian)
21. Kholmyanskii, M.A. Local natural electric fields of the Arctic shelf of the USSR. Extended abstract of Doctoral Sci. Dissertation, Leningrad, 1986, 38 p. (in Russian)
22. Sharabatyan, A.A. *Ekstremal'nye otsenki v geotermii i geokriologii* [Extreme estimates in geothermal and geocryological studies]. Moscow, Nauka, 1974. 124 p. (in Russian)

23. Shpolyanskaya, N.A. *Pleistotsen-golotsenovaya istoriya razvitiya kriolitozony Rossiiskoi Arktiki "glazami" podzemnykh l'dov* [Pleistocene-Holocene history of the development of the Russian Arctic permafrost zone "through the eyes" of underground ice]. Moscow-Izhevsk, Izd-vo Instituta komp'yuternykh issledovaniy, 2015, 370 pp. (in Russian)
24. Hinz K., Delisle G., Block M. Seismic evidence for the depth extent of permafrost in shelf sediments of the Laptev Sea, Russian Arctic. Proceedings of the Seventh International Conference PERMAFROST. Yellowknife (Canada), Collection Nordicana, no. 55, pp. 53–57.
25. Hobson G.D. Hammer seismic investigation, Good Spirit Lake area, *Pap. Geol. Surv. Can.*, 1967, no. 1, pp. 37–41.
26. Lozan Jose, Grabi Harimuf, Hupfer Peter. Climate of the 21 st century: changes and risks. Hamburg, 2002. 450 p.
27. Rogers J.C., Morack J.L. Geophysical investigation of offshore permafrost, PrudHoe Bay, Alaska. Proceedings of the 3th Intern. Conf. on Permafrost, Edmonton, Canada, 1978, vol. 1, pp. 560–566.
28. Permafrost in the Beafort Sea, Alaska. Proceedings of the 4th Intern. Conf. on Permafrost, Fairbanks, USA, 1983, vol. 1, pp. 894–898.

CRYOLITHOZONE OF THE NORTHWESTERN ARCTIC SHELF OF RUSSIA

M. A. Kholmianskii*, A. O. Kartashev*, E. M. Snopova, M.V. Vladimirov**

**Gramberg All-Russia Scientific Research Institute for Geology and Mineral Resources of the Ocean (VNIIOkeangeologiya),
Angliiskii pr. 1, St. Petersburg, 190121 Russia.*

E-mail: holm936@rambler.ru

***TechnoTerra Co. Ltd., nab.r. Fontanka, 113a, St. Petersburg, 190031 Russia.*

E-mail: snopova-katya@mail.ru

Geocryological maps published at the turn of the 1990s and 2000s were based on scant actual data of drilling and logging of permafrost formations, on results of thermodynamic modeling and the use of the method of analogies, i.e., the transfer of characteristics of well researched land permafrost formations on similar in geological structure and paleogeography areas of the shelf.

Based on the analysis of paleogeography, paleoclimatic and geomorphological situation in the Barents, the White and Kara seas during the Quaternary period, the version of various options of the shelf permafrost structure of these seas has been formulated.

The authors analyzed existing materials, articles and reports, including rare data on drilling, logging and modeling; they studied the results of electric exploration with transient electromagnetic method in the near field that were carried out for the first time with geocryological purpose and examined all available seismic and seismic-acoustic materials. Based on the data obtained, the new version of geocryological map of the northwestern Arctic shelf of Russia with thickness determination of specific types of permafrost formations and their spatial boundaries has been created.

Key words: *cryolithozone, geocryological map of the shelf, transient electromagnetic method in the near field, permafrost formations, the structure permafrost of shelf, seismic and seismic-acoustic data interpretation.*